

Sandoval-Gio, J.J., Balaguera-Torres, M.D., Pascual-Jimenez, C., Ruz-Febles, N.M., Osorio-Montalvo, P.M. 2026. La actividad de la lisozima, un biomarcador sensible de la respuesta inmunitaria en organismos acuáticos: el modelo emergente del pulpo maya. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 8(1): 21-32. doi 10.26359/52462.0802



La actividad de la lisozima, un biomarcador sensible de la respuesta inmunitaria en organismos acuáticos: el modelo emergente del pulpo maya

Lysozyme activity, a sensitive biomarker of the immune response in aquatic organisms: the emerging model of the Mayan octopus

Juan Jose Sandoval-Gio^{1,}, Miguel David Balaguera-Torres¹,
Cristina Pascual-Jimenez², Nery María Ruz-Febles¹
y Pedro Manuel Osorio-Montalvo¹*

¹Tecnológico Nacional de México, campus Tizimin

²Facultad de Ciencias, unidad Sisal, Yucatan
Universidad Nacional Autónoma de México

**Autor de correspondencia: jsandovalgio@gmail.com*

doi 10.26359/52462.0802

Recibido 28/enero/2026. Aceptado 04/marzo/2026

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

La función esencial del sistema inmune (SI), tanto en vertebrados superiores como en peces, es la defensa en contra de cualquier agente extraño físico, químico o biológico (antígeno o estresor) que pueda poner en riesgo el equilibrio homeostático del organismo. El SI lleva a cabo su acción a través de dos mecanismos principales, denominados inmunidad innata e inmunidad adquirida. Cada uno de estos tipos de respuesta inmune se clasifica a su vez, en inmunidad celular o humoral, si se activa por efectores celulares o está asociada a sustancias solubles, respectivamente. Se tiene además el conocimiento de que ambas formas de inmunidad, celular o humoral, pueden responder de forma específica o inespecífica a la presencia del agente estresor. En lo que respecta a la activación, mecanismos y componentes involucrados del SI en vertebrados superiores, existen diferencias con respecto a organismos invertebrados. Por ejemplo, los invertebrados no producen inmunoglobulinas (anticuerpos) y más aún, la respuesta en invertebrados marinos ocurre generalmente por acción innata, humoral e inespecífica, con la actividad de la lisozima, como uno de los principales mecanismos. La lisozima es una molécula que está presente en suero, plasma, moco cutáneo, hígado y branquias de peces óseos y en el caso de invertebrados, se ha determinado en hemolinfa y mucus. Un estudio reciente en el pulpo maya *Octopus maya*, uno de los principales recursos pesqueros de la península de Yucatán y de México, ha cuantificado la actividad de la lisozima proyectando su uso como bioindicador de relevancia en eco fisiología y sanidad acuícola.

Palabras clave: respuesta inmune, invertebrados marinos, cefalópodos, *Octopus maya*

Abstract

The essential function of the immune system (IS), in both higher vertebrates and fish, is to defend against any foreign physical, chemical, or biological agent (antigen or stressor) that could jeopardize the organism's homeostatic balance. The IS carries out its action through two main mechanisms, called innate immunity and acquired immunity. Each of these types of immune response is further classified as cellular or humoral immunity, depending on whether it is activated by cellular effectors or associated with soluble substances, respectively. It is also known that both forms of immunity, cellular and humoral, can respond specifically or nonspecifically to the presence of the stressor. In higher vertebrates, such as humans, there are differences in the activation, mechanisms, and components involved of the IS compared to invertebrate organisms. For example, invertebrates do not produce immunoglobulins (antibodies), and furthermore, the response in marine invertebrates generally occurs through innate, humoral, and nonspecific action, with lysozyme activity being one of the main mechanisms. Lysozyme is a molecule present in the serum, plasma, cutaneous mucus, liver, and gills of bony fish, and in invertebrates, it has been found in hemolymph and mucus. A recent study on the Mayan octopus *Octopus maya*, one of the main fishing resources of the Yucatan Peninsula and Mexico, has quantified the activity of lysozyme, projecting its use as a relevant bioindicator in ecophysiology and aquaculture health.

Key words: Immune response, marine invertebrate, cephalopods, *Octopus maya*



Introducción

En la escala evolutiva, los peces tienen bien desarrollada un tipo de respuesta inespecífico, en donde la inflamación o la producción de moco, son procesos recurrentes de defensa local para la eliminación de agentes extraños. Sin embargo, la implementación de mecanismos de defensa más específicos también se encuentra definido en teleósteos. El sistema inmune de los peces tiene similitud con las aquel que poseen los vertebrados superiores; entra las que se encuentran por ejemplo, que pueden reaccionar a la presencia de antígenos con la producción de inmunoglobulinas (glicoproteínas que tienen la capacidad de unirse de manera específica a un antígeno definido) y poseen anamnesia (memoria inmunológica), es decir, pueden responder a reiteradas exposiciones de un mismo antígeno, con una producción de anticuerpos más rápida, más eficiente y de mayor magnitud que en la primera exposición (Sandoval-Gío *et al.*, 2008).

Los principales órganos linfoides (productores de linfocitos, las células de defensa del organismo) de

los peces son el timo, riñón cefálico y bazo. Los teleósteos carecen de médula ósea (Rubio-Godoy, 2010), como los vertebrados superiores; sin embargo, el riñón craneal es análogo a ese órgano, conteniendo alta cantidad de macrófagos que realizan su función fagocitaria frente a la exposición a antígenos (Björger & Koppang, 2021).

Las inmunoglobulinas descritas en los peces son de tipo esencialmente IgH, IgM, IgD e IgT/Z, en contraste con los cinco tipos encontrados en vertebrados superiores (Salinas *et al.*, 2021). En los peces, a su vez, se han descrito dos tipos de mecanismos de este sistema inmune: una respuesta inmune o inmunidad natural o innata, que es la que poseen los peces desde el nacimiento y otra denominada adquirida o adaptativa que, como su nombre lo indica, se adquiere después de la exposición a un antígeno. En ambos casos existe una subclasificación que divide estas respuestas en dos: una llamada humoral y otra denominada celular (figura 1).

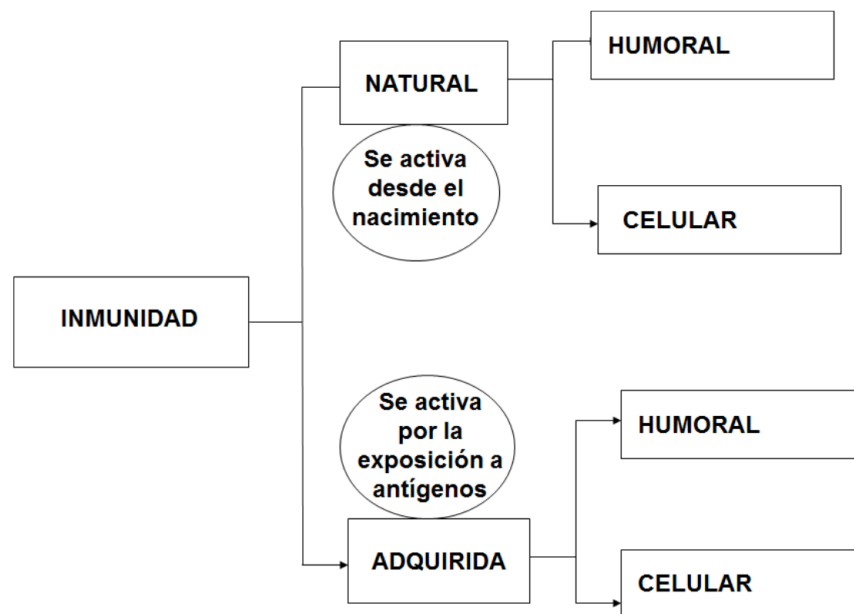


Figura 1. Clasificación de la respuesta inmune en peces (Tomado de Sandoval-Gío, 2012).



Inmunidad innata

Este tipo de inmunidad está conformada por componentes corporales que existen aún antes de la exposición a un antígeno (de hecho, está activada desde el nacimiento) e incluye barreras físicas y químicas como la piel, mucosas o el pH del estómago. Además, la conforman sustancias solubles y células que se encargan de mecanismos de englobamiento de los agentes extraños con afán de eliminarlos (fagocitosis) (Rubio-Godoy, 2010). Los tipos de inmunidad innata humoral y celular se han descrito con amplitud en peces del trópico y de latitudes templadas.

Respuesta humoral

Este tipo de inmunidad está altamente desarrollada en teleósteos. Entre los diversos factores solubles (humorales) presentes en moco y suero están la proteína C reactiva (CRP, por sus siglas en inglés) y la lisozima. Ambas constituyen una barrera de defensa química primaria contra patógenos potenciales, junto con la piel (barrera física). Se sabe que la concentración de lisozima puede variar en condiciones ambientales diferentes a las basales o entre distintas especies de peces (Mesalhy Aly *et al.*, 2008). La transferrina, además de la CRP se encuentra en el suero y aparece por breves periodos o aumenta su concentración en situaciones febriles en vertebrados superiores. La CRP mantiene una concentración constante en peces y aumenta considerablemente como respuesta a situaciones de estrés físico o biológico, como manipulación excesiva, o infección bacteriana (Li *et al.*, 2022).

En mención aparte se encuentran las citoquinas que aglomeran a diversas glicoproteínas cuya función es la de ser mensajeros en el sistema inespecífico de defensa natural. Entre las principales citoquinas se hallan las interleuquinas (IL, por sus siglas en inglés) 1 y 2 y el interferón (IFN, por sus siglas en inglés). La IL-2 juega un papel importante en peces infectados con virus o parásitos, ya que incrementa su concentración en el suero; por otro lado, la implicación del IFN es más directa en infecciones

virales. Estas moléculas suelen llamarse proteínas de fase aguda y ejercen conjuntamente funciones de regeneración después de procesos inflamatorios como respuesta a eventos traumáticos.

Así mismo, el sistema de complemento agrupa a una serie de proteínas que se activan ante la presencia de ciertas sustancias extrañas en el organismo, desencadenándose un proceso inflamatorio. Puede ser activado por dos vías, la clásica o dependiente de anticuerpo y la alternativa, no dependiente de anticuerpo. En este sentido, puede afirmarse que, aunque la clasificación del sistema inmune está bien caracterizada, cada tipo de respuesta no es ajena a otra sino que por el contrario, varias pueden llevarse a cabo al mismo tiempo complementándose con el objetivo de destruir al antígeno.

Respuesta celular

Las células del sistema inmune pueden ser de varios tipos: linfocitos B, linfocitos T, granulocitos y células citotóxicas no específicas. La mayoría de estas células leucocitarias (también llamados glóbulos blancos o células de defensa) se encargan del proceso de englobamiento y destrucción de material extraño; a este proceso se le denomina fagocitosis. Las células granulocíticas son grandes y contienen en su citoplasma material granulado (análogas de los eosinófilos y neutrófilos en mayor proporción y de los basófilos, en menor) y se encuentran en lugares estratégicos como la cavidad peritoneal, el riñón craneal y el tracto intestinal, para ejercer esta función fagocitaria. Las células no granulocíticas, al igual que los monocitos-macrófagos (denominadas de una forma si están en sangre o de otra si están en tejidos) también llevan a cabo la fagocitosis, con una inherente presentación y procesamiento del antígeno. Las células “*natural killer*” (NK, por sus siglas en inglés) están involucradas, en cambio, en mecanismos de citotoxicidad y apoptosis (muerte celular programada), esta última, descrita ampliamente en diversos teleósteos, incluyendo a la tilapia (Ishimoto *et al.*, 2004).



Inmunidad adquirida

La inmunidad adquirida o adaptativa tiene la principal característica de ser específica y es activada cuando un organismo está expuesto a varios antígenos, sea biológico, químico o físico. Como respuesta, el organismo construye un mecanismo de defensa específico para cada antígeno. En el caso de antígenos biológicos, esta respuesta se magnifica y se vuelve más eficaz si se dieran infecciones repetidas del mismo microorganismo, fenómeno denominado memoria inmunológica. Esta respuesta secundaria se da de manera más rápida y es de menor duración que la que primera exposición al mismo antígeno y puede ser estimulada tanto por agentes infecciosos (como los ectoparásitos), como por no infecciosos.

Respuesta humoral

Los actores principales de este tipo de defensa son los anticuerpos o inmunoglobulinas. Desde su definición básica hasta su composición bioquímica estructural, estas sustancias conforman la línea evolutiva más avanzada del sistema de defensa de vertebrados, pues poseen una alta especificidad. Un anticuerpo es una inmunoglobulina que es producida por el sistema inmune de un organismo en respuesta a un antígeno, luego de la maduración y acción bioquímica de las células plasmáticas (linfocitos B). De estas glicoproteínas de alto peso molecular (de 600 a 800 kDa), se ha descrito una molécula tipo IgM en teleósteos, tetra o dimérica. La IgM es la primera que se activa en una respuesta primaria de vertebrados superiores frente a la exposición antigénica y en peces se ha determinado esta función, aunque en menor grado; además de que se relaciona con funciones de activación del complemento y neutralización de virus o bacterias. Últimamente se ha descrito en peces a otra inmunoglobulina, similar a la IgD de mamíferos, aunque se desconoce con detalle su función. La poca

diversidad de clases de inmunoglobulinas en peces se compensa, sin embargo, por la alta flexibilidad de su estructura consistente en dos subunidades de cadenas pesadas y dos ligeras. En la actualidad se conoce que la producción de anticuerpos en un organismo, en especial poiquiloterma, como respuesta a un antígeno puede estar influenciada por distintos factores, siendo los más representativos la temperatura y los cambios estacionales, aunque también influyen aspectos intrínsecos de los peces como la edad, el sexo o el grado de estrés en que se encuentren (Olabuenaga, 2000).

Respuesta celular

Los linfocitos T se encargan de este tipo de defensa, los cuales, al tener una etapa de sensibilización por la presencia de un antígeno, producen citotoxicidad por un lado y linfoquinas por otro; de igual forma alcanzan una interacción con otro tipo de leucocitos granulares optimizando la respuesta de fagocitosis a un agente extraño. Estas células son pequeñas en comparación con otras células blancas, del tipo granulocítico; y la mayoría de estos linfocitos son producidos en el riñón craneal y en el timo en los peces (Nakanishi *et al.*, 2015). Sobre la caracterización fenotípica de las poblaciones linfocitarias se conoce poco y en la medida de que aumenten las investigaciones al respecto, podrán conocerse mejor sus funciones específicas. Al respecto se sabe que las células NK son capaces de lisar células extrañas por contacto físico directo; las células supresoras (LTs) se encargan de la regulación de la producción de inmunoglobulinas por los linfocitos B y las células colaboradoras o “helper” (LTh), que ayudan a los mismos LB liberando ante la estimulación antigénica mensajeros solubles o linfoquinas que aumentan la capacidad de defensa contra el agente extraño



Actividad de la lisozima

La lisozima, también llamada muramidasa (N-acetil muramidaglicano hidrolasa), rompe el enlace 1,4 - β - glucosídico entre la N- acetilglucosamina y el ácido N-acetilmurámico de las paredes celulares bacterianas, las cuales tienen el propósito para lisar dichas células, lo cual es utilizado para la defensa inmunológica. (Van Herreweghe & Michiels, 2012).

Se ha investigado que las lisozimas tipo c y tipo g están presentes en todos los vertebrados, mientras que los invertebrados producen principalmente lisozimas tipo i (Wang *et al.*, 2018). Este subtipo de lisozima poseen diversas funciones de lisis, como quitinasa, isopeptidasa, muramidasa (Van Herreweghe & Michiels, 2012)

En el caso de los peces, las lisozimas, se sintetizan en el hepatopáncreas y otros sitios, como el moco de la piel y del intestino, plasma y tejido linfático, interactúan con compuestos del sistema inmunológico con el fin de modular la respuesta inmunitaria humoral (Mokhtar, *et al.*, 2023). Todas las propiedades anteriormente mencionadas están asociadas con las barreras epiteliales, el sistema respiratorio, y circulatorio de múltiples organismos acuáticos por ejemplo los bivalvos y peces (Van Herreweghe & Michiels, 2012).

Está bien documentado que la actividad de la lisozima no sólo tiene variaciones dependiendo de la especie de pez estudiada o del grado de estrés en el que se encuentre, sino que factores intrínsecos, como el sexo y la madurez sexual, o extrínsecos como la estacionalidad y consecuentemente la temperatura y pH del agua influyen en la actividad de la enzima (Saurabh & P K Sahoo, 2008).

La cuantificación de la actividad de la lisozima en suero o plasma ha resultado ser un indicador útil de la intervención de la respuesta inmune humoral inespecífica en peces (Mesalhy Aly *et al.*, 2008). Esta sustancia se ha encontrado en sangre, secreciones mucosas y diversos órganos de teleosteos funcionando como un potente agente proteolítico de paredes celulares bacterianas. A la fecha existen di-

versas investigaciones en organismos acuáticos que avalan la liberación de esta sustancia por células involucradas en procesos inespecíficos, en especial el de fagocitosis como respuesta a la presencia natural o inducida de material extraño (Hutchinson & Manning, 1996; Swain *et al.*, 2007).

Con respecto a la metodología para determinar la actividad de la lisozima se ha estandarizado un ensayo turbidimétrico en placa utilizando lisozima de huevo (SIGMA, USA) como estándar. Se determina la reducción en la absorbancia a 450 nm en un lector de ELISA (1-11 minutos de incubación a 22°C). Una unidad de actividad de la lisozima se definió como una reducción de 0.001 min mL⁻¹ en la absorbancia obtenida. Los valores se expresaron en U/ml (Lee & Yang, 2002).

Entre todos los tipos de origen animal, las lisozimas tipo c y tipo g están presentes en todos los vertebrados, mientras que los invertebrados producen principalmente lisozimas tipo i y parcialmente producen lisozimas tipo c, tipo ch o tipo g (Callewaert & Michiels, 2010). Además, las lisozimas tipo i exhiben múltiples actividades, como quitinasa, isopeptidasa, muramidasa y no enzimática (Van Herreweghe & Michiels, 2012).

En algunas especies como trucha arcoiris *Oncorhynchus mykiss* y salmón, la presencia de agentes estresantes, incluso condiciones de infecciones inducidas provocaron un incremento de la actividad de la lisozima (Demers & Bayne, 1997). Sin embargo, para otras especies como *O. niloticus*, se observaron cambios mínimos o disminuciones en la actividad enzimática para peces sometidos a estrés por inducción de infecciones (Caruso & Lazard, 1999).

Un estudio previo en tilapia *Oreochromis niloticus* no registró cambios en la actividad de la lisozima debido a agentes quimioterapéuticos en la tilapia (Sandoval-Gío *et al.*, 2019), por lo que los autores sugieren que esta especie no activa esta modalidad de respuesta innata en procesos de estrés por un tratamiento con formalina y que la respuesta inmunitaria inespecífica producida por la sustancia se



basa en procesos de inflamación en tejidos expuestos, en especial en branquias, debido al proceso de insuficiencia respiratoria que genera en primera instancia, específicamente, debido a una infiltración de células fagocíticas, granulocitos y células citotóxicas naturales al sitio de daño que liberan sustancias como la histamina, prostaglandinas y leucotrienos (Pickering, 1998).

Entre los objetivos este estudio no se encontraba hacer una distinción de los cambios en la actividad enzimática dependiendo del sexo de los peces. Cabe mencionar que éstos fueron seleccionados en un estado juvenil de madurez sexual, que es donde se han hallado mejores patrones de la actividad enzimática (Hutchinson & Manning, 1996).

Sistema circulatorio en cefalópodos

Los cefalópodos tienen un sistema circulatorio cerrado el cual consta de un corazón sistémico central, y dos corazones branquiales que ayudan a la circulación de la hemolinfa hacia las branquias (Castillo *et al.*, 2015).

El sistema inmunológico de los cefalópodos está compuesto principalmente por componentes celulares y humores que protegen al organismo de infección y enfermedades (Wang *et al.*, 2018). Gran parte de los mecanismos de defensa celulares incluyen las reacciones fagocíticas y citotóxicas de los hemocitos. Los hemocitos también conocidos como células periféricas son la primera línea de defensa contra sustancias extrañas las cuales son capaces de realizar procesos de fagocitosis, encapsulación, neutralización, así como participar en procesos inflamatorios y de cicatrización de heridas, por otra también participan en el proceso de digestión y transporte de nutrientes (Castellanos-Martínez & Gestal, 2013).

Efecto de la variación de temperatura en *Octopus maya*

Estudios realizados en machos *O. maya* han reportado que animales expuestos durante 30 días a una temperatura de 30°C, se afecta el desempeño reproductivo comprometiendo la reproducción de los machos, en el daño de los testículos por temperatura alta (López *et al.*, 2021), afectando la viabilidad de los huevos y el crecimiento de la progenie. Por consiguiente, estudios previos han demostrado que la especie *O. maya* bajo estrés térmico (tem-

peraturas mayores a 27 °C) presenta alteraciones en el desarrollo embrionario (Caamal-Monsreal *et al.*, 2016, sobrevivencia y crecimiento (Noyola *et al.*, 2013) y desove (Caamal-Monsreal *et al.*, 2016). Estudios realizados en laboratorio han demostrado que un intervalo de temperatura de 18 a 27 °C es óptimo para procesos como crecimiento y supervivencia, en un intervalo de 22 a 26 °C es óptimo para procesos reproductivos en *O. maya*. (Ángeles *et al.*, 2020)

Lisozima en *Octopus maya*

En los cefalópodos, hay muy pocos estudios los cuales han investigado la actividad de las lisozimas, algunos resultados respaldan en trabajos previos que ofrecen al huésped protección contra organismos patógenos al aumentar su expresión y actividad tras la exposición a bacterias y sus productos. Un ejemplo es que en pulpos *E. cirrhosa*, la inyección con una bacteria Gram (-), aumento la actividad de la lisozima en varios tejidos, pero más en el corazón branquial, otros estudios en *Octopus vulgaris*, inyecciones también con bacterias como la *E. coli* la cual aumento la actividad de lisozima en el suero, en sepias *S. officinalis*, un estudio reciente informo actividad de lisozima en una variedad de tejidos, pero más prominentemente en aquellos expuestos al ambiente externo (tegumento – manto), y los órganos del sistema circulatorio (corazón branquial, corazón sistémico, cuerpo blanco y branquias).



Estudios realizados por Balaguera-Torres *et al.* (2025), determinó el efecto de la temperatura de (30 °C), sobre el estado inmunológico en el pulpo *Octopus maya* evaluando la actividad de lisozima enzima capaz de hidrolizar componentes de la superficie de microorganismos (Locatello *et al.*, 2013), para este estudio se utilizaron 14 machos silvestres, los cuales fueron divididos en tres grupos: recién capturados, mantenidos por 21 días a dos temperaturas: 24 y 30 °C, se utilizaron dos módulos de recirculación para el control térmico, para la temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$, en donde se mantenía con el uso de aire acondicionado y un enfriador (chiller), el sistema de temperatura alta se manejó un espacio separado, en el cual se le incremento la temperatura del agua gradualmente (1 °C por día), donde usaron un calentador automático de 1800 Watts (Caamal – Monsreal *et al.*, 2016). Al alcanzar la temperatura de 30 °C se mantuvo constante por 21 días y durante el periodo experimental los organismos los alimentaron dos veces al día (9: 30 y 17: 00 hrs). Para realizar el análisis inmunológico los organismos los anestesiaron con (1 % etanol

y 2% MgCl_2), para obtener dos tejidos mucus y hemolinfa. El análisis estadístico aplicado fue un análisis de varianza para comparar las variables inmunológicas entre los grupos: recién capturados, mantenidos a 24 °C y 30°C, en donde la actividad de lisozima en el tejido plasma no observaron diferencia significativa ($p < 0.631$) entre los grupos, donde los valores que obtuvieron fueron similares para los animales recién capturados (6.29 U mL^{-1}), mantenidos a 24°C (6.64 U mL^{-1}), y 30°C (7.29 U mL^{-1}), pero se observo un incremento de un 13 % en el valor promedio de los pulpos mantenidos a 30°C 7.29 mL^{-1} a comparación de los pulpos recién capturados y mantenidos a 24 °C, (6.29 y 6.64 U mL^{-1} respectivamente, esto indica el autor que podría estar relacionado con una mayor carga microbológica en el agua de mar a 30°C, no obstante no incluyeron en el estudio la valoración de la concentración bacteriana en el sistema experimental, lo cual indican los autores que es un área de oportunidad para lograr una mejor interpretación para nuevos estudios.

Conclusiones y perspectivas

En teleósteos, la lisozima se ha encontrado en diversos tejidos y estructuras, como suero, plasma, moco cutáneo, hígado y branquias por lo que su cuantificación va tomando relevancia en sanidad acuícola, sin embargo, la actividad de la lisozima no se ha investigado suficientemente en cefalópodos,

Algunos resultados respaldan en trabajos previos que ofrecen al huésped protección contra organismos patógenos al aumentar su expresión y actividad tras la exposición a bacterias y sus productos. Un ejemplo es que en pulpos *E. cirrhosa*, la inyección con una bacteria Gram (-), aumento la actividad de la lisozima en varios tejidos, pero más en el corazón branquial, otros estudios en *Octopus vulgaris*, inyecciones también con bacterias como la *E. coli* la cual aumento la actividad de lisozima en

el suero, en sepias *S. officinalis*, un estudio reciente informo actividad de lisozima en una variedad de tejidos, pero más prominentemente en aquellos expuestos al ambiente externo (tegumento – manto), y los órganos del sistema circulatorio (corazón branquial, corazón sistémico, cuerpo blanco y branquias)

La actividad antibacterial evaluada a través de la lisozima en plasma no presentó diferencias entre los grupos estudiados (24 y 30 °C, 7 y 21 días), pese a esto, se observa una disminución de 17.7 % en los organismos expuestos a 30 °C en 21 días, esto concuerda con baja actividad de lisozima evaluada en los pulpos silvestres capturados en localidades y meses más cálidos lo cual fue interpretado como una inmunosupresión ante un ambiente térmico no adecuado para la especie (Ángel-Gonzales *et al.*,



2025). La actividad de lisozima también podría estar relacionada con una mayor carga microbiana en el agua de mar mantenida a 30 °C, no obstante, este estudio no incluyó la valoración de la concentración bacteriana en el sistema experimental, señalando un área de oportunidad para lograr una mejor interpretación en estudios posteriores.

En cuanto a la lisozima en el mucus, este estudio representa el primer reporte para *Octopus maya*. El análisis estadístico indica que la actividad no se ve afectada de manera significativa de los factores experimentales, no obstante, la mayor actividad se obtuvo en los pulpos mantenidos a 24 °C por 7 días. Este mismo patrón se observó en la actividad de lisozima evaluada en los tejidos inmunológicos, el mucus y la hemolinfa. La actividad de lisozima en los animales expuestos a 30 °C en 21 días fue 15 % mayor respecto a los animales expuestos a 24 °C por 21 días, estos resultados concuerdan con el trabajo realizado por Vizcaino *et al.*, 2023, quienes evaluaron el efecto del estrés espacial (limitación de movimiento por 17 días) a través de biomarcadores inmunológicos evaluados el mucus de la piel, señalando variaciones significativas a los 5 y 11 días.

En la actualidad, el incremento en las investigaciones básicas sobre procesos metabólicos en parásitos y sus hospederos, favorecerá la obtención de estos parámetros basales y podrán mejorarse con los obtenidos de la aplicación molecular de técnicas utilizadas para vertebrados superiores, ya que abrirán direcciones que muy pronto harán las pruebas diagnósticas se encuentren disponibles para acui-

cultores, para beneficio de la población consumidora en general. La investigación diagnóstica exige además poder contar con condiciones diversas, pudiéndose incluir el estadio del pez, ya sea en etapas tempranas o de reproducción; además de su sexo y las condiciones ambientales que acompañan al patógeno.

Otra necesidad imperante en el diagnóstico inmunológico de peces es que al poder realizarlas de manera cotidiana, se podría tener de una manera expedita y continua datos sobre el monitoreo de la salud de un ecosistema dada la relación entre contaminantes ambientales o sustancias utilizadas en tratamientos quimioterapéuticos y la posible supresión del sistema inmune de peces.

Por otro lado, al conocer que los cambios estacionales, temperatura del agua, o calidad de ésta, además de mal manejo de los organismos puede desencadenar la depresión del sistema de defensa de los peces y conocer cómo responden a estos cambios resultará en la posibilidad de poder contar con técnicas inmunológicas que puedan detectar la presencia de parásitos en estados subclínicos de la enfermedad. Así se podrán mejorar las estrategias de control o erradicación de estos patógenos, así como la implementación de vacunas o administración de sustancias inmunoestimulantes que puedan otorgar a los peces resistencia temporal o permanente y lograr así, que los cultivos puedan optimizar su producción, para beneficio de la población.

Agradecimientos

Los resultados presentados son parte del proyecto financiado por el TecNM "Evaluación de indicadores reproductivos, metabólicos e inmunológicos en el pulpo *Octopus maya* expuesto a un ambiente modificado de temperatura" con clave 22513.25-P.



Referencias

- Ángeles, L. E., Martínez, E., Yañez, C., Velázquez, I., García, A., Días, F., Tremblay, N., Flores, M. A., Gebauer, P., Rosas, C. 2020. Using realized thermal niche to validate thermal preferences from laboratory studies. How do they stand? Elsevier. 118: 1-9
- Balaguera – Torres, M. D., Sandoval Gio, J. J., Sánchez-Arteaga A., Cruz-López H., Rosas Vásquez C., Pascual Jiménez, C. 2025. Efecto de la exposición a la alta temperatura sobre el sistema inmunológico en pulpo *Octopus maya*. *Revista del centro de graduados e investigación. Instituto tecnológico de Mérida*. 40(110) 180-185.
- Björngen, H., Koppang, E.O. (2021). Anatomy of teleost fish immune structures and organs. *Immunogenetics* 73 , 53–63. <https://doi.org/10.1007/s00251-020-01196-0>
- Caamal-Monsreal, C., Uriarte, I., Farias, A., Diaz, F., Sánchez, A., D., Rosas, C. 2016. Effects of temperature on embryo development and metabolism of *O. maya*. *Aquaculture*, 415: 156 – 162.
- Callewaert L, Michiels CW. 2010. Lysozymes in the animal kingdom. *J Biosci.*, 35(1):127-60. doi: 10.1007/s12038-010-0015-5.
- Caruso, D., Lazard, J. 1999. Subordination stress in Nile tilapia and its effect on plasma lysozyme activity. *Journal of Fish Biology*, 55(2): 451–454. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1999.tb00690.x>
- Castellanos-Martínez, S., Gestal, C. 2013. Pathogens and immune response of cephalopods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 447: 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.02.007>
- Castillo, M. G., Salazar, K. A., Joffe, N. R. 2015. The immune response of cephalopods from head to foot. *Fish & shellfish immunology*, 46(1): 145-160.
- Demers NE, Bayne CJ. 1997. The immediate effects of stress on hormones and plasma lysozyme in rainbow trout. *Dev Comp Immunol.*, 21(4): 363-73. doi: 10.1016/s0145-305x(97)00009-8.
- Hutchinson T. H., Manning, M.J. 1996. Seasonal trends in serum lysozyme activity and total protein concentration in dab (*Limanda limanda* L.) sampled from Lyme Bay, U.K., *Fish & Shellfish Immunology*, 6(7): 473-482; <https://doi.org/10.1006/fsim.1996.0045>.
- Ishimoto Y., Savan R., Endo M, Sakai M. 2004. Non-specific cytotoxic cell receptor (NCCRP)-1 type gene in tilapia (*Oreochromis niloticus*): its cloning and analysis. *Fish Shellfish Immunol.*, 16(2):163-72. doi: 10.1016/S1050-4648(03)00059-7.
- Lee, Y.C., Yang, D. 2002. Determination of lysozyme activities in a microplate format. *Analytical Biochemistry*, 310(2): 223-224
- Locatello, L., Fiorito, G., Finos, L., Rasotto, M.B. 2013. Behavioural and immunological responses to an immune challenge in *Octopus vulgaris*. *Physiol. Behav.* 122
- Li Q, Jiang B, Zhang Z, Huang Y, Xu Z, Chen X, Cai J, Huang Y, Jian J. 2022. CRP Involved in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) against Bacterial Infection. *Biology (Basel)*. 30; 11(8):1149. doi: 10.3390/biology11081149.
- López, E. 2021. El oxígeno disuelto reduce el campo del metabolismo aeróbico y no modifica el umbral térmico de los juveniles de *Octopus maya*. [Tesis de maestría] Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mokhtar, D.M., Zaccane, G., Alesci, A., Kuciel, M., Hussein, M.T., Sayed, R.K.A. 2023. Main Components of Fish Immunity: An Overview of the Fish Immune System. *Fishes*, 8, 93. <https://doi.org/10.3390/fishes8020093>
- Nakanishi T, Shibasaki Y, Matsuura Y. T. 2015. Cells in Fish. *Biology (Basel)*. 4(4): 640-63. doi: 10.3390/biology4040640.
- Noyola, J., Caamal-Monsreal, C., Díaz, F., Re, D., Sanchez, A., Rosas, C. (2013). Thermopreference, tolerance and metabolic rate of early stages juvenile *Octopus maya* acclimated to different temperatures. *Journal of thermal biology*, 38(1): 14-19.
- Olabeuena, Susana E. (2000). Fish immune system. *Gaceta (Concepción)*, 64(2), 205-215. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382000000200010>
- Pickering, A.D. 1998. Stress responses of farmed fish, pp. 222-255. In: Black, K.D., Pickering, A.D. (Eds.). *Biology of farmed fish*. Sheffield Academic Press, Sheffield,
- Rubio-Godoy, M. 2010. Inmunología de los peces óseos. *Revisión Técnica Pecuaria en México*, vol. 48 (1): 43-57.
- Salinas, I., Fernández-Montero, Á., Ding, Y., Oriol Sunyer, J. 2021. Mucosal immunoglobulins of teleost fish: A decade of advances. *Developmental & Comparative Immunology*, 121, 104079, ISSN 0145-305X <https://doi.org/10.1016/j.dci.2021.104079>
- Sandoval-Gío, J.J., Rodríguez-Canul, R., Vidal-Martínez, V.M. 2008. Humoral antibody response of the Tilapia *Oreochromis niloticus* against *Cichlidogyrus* spp. (Monogenea). *Journal of Parasitology*, 94(2): 404-409.
- Sandoval-Gío, J.J. 2012. Caracterización de la respuesta inmune en peces, plataforma para optimizar el diagnóstico acuícola en la región. En: Contribución de la Biotecnología al Desarrollo de la península de Yucatán, Dumontel, E. (Ed.). CONACYT Sociedad de Biotecnología y Bioingeniería.
- Sandoval-Gío J. J., Rodríguez-Canul R. P., Vidal-Martínez V. M., Fajer-Ávila E. J., Améndola-Pimenta M. 2019. Formalin toxicity to *Oreochromis niloticus*; its effectiveness against *Cichlidogyrus* spp. and host stress response. *Latin American Journal Of Aquatic Research*, 47(1): 34–41.
- Saurabh, S., Sahoo, P.K. 2008. Lysozyme: An Important Defence Molecule of Fish Innate Immune System. *Aquaculture Research*, 39: 223-239. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01883.x>
- Saurabh, S., Sahoo, P K. 2008. Lysozyme: an important defence molecule of fish innate immune system. *Aquaculture Research*, 39, 223-239.



- Swain, P., Dash, S., Sahoo, P.K., Routray, P., Sahoo, S.K., Gupta, S.D., Meher, P.K., Sarangi, N. 2007. Non-specific immune parameters of brood Indian major carp *Labeo rohita* and their seasonal variations, Fish & Shellfish Immunology, Volume 22, Issues 1–2, Pages 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2006.03.010>
- Van Herreweghe JM, Michiels CW. 2012 Invertebrate lysozymes: diversity and distribution, molecular mechanism and in vivo function. *J Biosci.*, 37(2) :327–48. doi: 10.1007/s12038-012-9201-y. PMID: 22581338.
- Wang M.Q., Wang, B.J., Liu, M., Jiang, K.Y., Wang L. 2018. An i-type lysozyme (CfLyzI) involved in innate immunity is essential for the survival of *Chlamys farreri* during *Vibrio* stimulation. *ISJ*, 15: 285–293,

